УДК 621.311.001

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый

Томский политехнический университет
E-mail: Svech@tpu.ru

Рассмотрены результаты разработки математической модели первичных двигателей, позволяющей без декомпозиции с высокой достоверностью моделировать все виды и типы первичных двигателей с детальным учетом разнообразных систем регулирования котлоагрегатами и турбинами. Приведены сведения об апробации и практическом использовании результатов.

Одним из наиболее сложных элементов современных электроэнергетических систем (ЭЭС) является первичный двигатель (ПД) электрических синхронных генераторов, которым обычно служит гидравлическая или паровая турбина со своими системами регулирования. В последнем случае в состав ПД входит также парогенератор с присущими ему системами регулирования и вспомогательным оборудованием (котлоагрегат).

Известная специфика энергосистем сводит к минимуму возможность получения информации о процессах в оборудовании и ЭЭС натурным путем, а их чрезвычайная сложность значительно ограничивает применение физического моделирования. В результате основным способом получения информации, необходимой для проектирования, эксплуатации и развития ЭЭС, оказывается математическое моделирование.

Динамика первичных двигателей существенно влияет на нормальные и аварийные процессы производства, распределения и потребления электроэнергии. Поэтому требование к уровню адекватности математической модели ПД постоянно возрастает.

Применяемые в различных программах расчета процессов в ЭЭС математические модели первичных двигателей весьма упрощены и отражают некий обобщенный ПД. В результате достоверность информации, полученной при моделировании, оказывается низкой. Использование такой информации при проектировании и эксплуатации энергоблоков и ЭЭС в целом прямо или косвенно становится причиной неправильной настройки систем регулирования, противоаварийной автоматики и нередко приводит к тяжелым авариям. В связи с вышеизложенным поставлена задача разработки математической модели ПД, позволяющей достаточно точно моделировать любой его конкретный тип.

Решение поставленной задачи осложнено тем, что в настоящее время в ЭЭС находится в эксплуатации множество различных типов турбин и котлоагрегатов с разнообразными системами и законами регулирования. Хотя передаточные функции отдельных элементов и звеньев этого оборудования известны, разработка цельной математической модели для конкретного типа оборудования и компоновки ПД оказывается уникальной. Это подтверждается многочисленными исследованиями особенностей и специфики работы парогенераторов с прямоточными и барабанными котлоагрегатами, применяемых систем и законов регулирования этими агрегатами, конденсационных турбин, в том числе с промежуточным пароперегревом, турбин с противодавлением, турбин с промышленными и теплофикационными отборами пара, гидротурбин и разнообразных систем регулирования перечисленными турбинами [1–5], которые показывают наличие у них как общих, так и принципиально отличающихся свойств. Таким образом, математическая модель даже самого сложного первичного двигателя не включает в себя более простые, и ее разработка не решает задачи в целом. Следовательно, встает задача разработки математической модели для каждого существенно отличающегося типа ПД. При этом необходимо учитывать для каждого вида первичного двигателя тенденции их модернизации, в том числе возможность значительных изменений.

Множество сложных математических моделей, в которых, не смотря на существенные различия, есть и общие фрагменты или сравнительно просто адаптируемые, является не оптимальным и не удобным для практического использования. Поэтому возникает еще и задача синтеза, на основе разработанных для каждого вида и типа ПД математических моделей, универсальной модели.

Опуская промежуточные результаты анализа, разработки и синтеза ниже приводится конечный результат решения поставленной задачи. Наиболее наглядной и исходной формой сложной динамической модели для всех возможных методов, способов и средств расчета является операторная схема, которая не только иллюстрирует математическое содержание модели, но и показывает структуру моделируемых объектов, что позволяет легко ориентироваться в ней и адаптировать ее для конкретных целей. Такая операторная схема разработанной математической модели первичных двигателей представлена на рис. 1, где соответствующими передаточными функциями отражены: $K_{ЗМ}$ – загрузка энергоблока, определяющая в регуляторе мощности (РМ) задаваемую энергоблоку мощность $P_{ЗД}$; $K_{ПАУ}$ – уровень послеаварийной разгрузки (догрузки) энергоблока $\pm\Delta P_{ПАУ}$, воздействующей через РМ и через электрогидравлический преобразователь (ЭГП);

$$\frac{P_{Э}}{P_{Г}} = \frac{K_{ИМ}}{1+T_{ИМ}\,p}$$

– измеритель мощности синхронного генератора (СГ);

$$\frac{\omega_{\text{чк}}}{\omega_{\Delta\text{ч}}} = \frac{K_{\text{чк}}}{1 + T_{\text{чк}} p}$$

– частотный корректор медленнодействующего контура (МдК) РМ;

$$\frac{P_{\Delta\text{д}}}{P_{\Delta\text{з}}} = \frac{T_{\text{зд}} p}{1 + T'_{\text{зд}} p}$$

– звено динамической коррекции МдК РМ; $K_{\Delta\rho}$ – канал коррекции МдК РМ по давлению свежего пара;

$$\frac{P_{\text{РМ}}}{P_{\Delta\sum}} = \frac{K_{\text{РМ}}}{1 + T_{\text{РМ}} p}$$

– общий канал МдК РМ; $K_{\text{РДС}}$ – общий канал регулирования мощности конденсационных турбин в режимах на скользящем давлении пара и регулирования давления пара перед турбиной «до себя», включая стерегущий режим, а также регулирования мощности турбин с противодавлением, турбин с промышленными и теплофикационными отборами пара; $K_{\text{АРЧМ}}$ – многофункциональное управление, в том числе для воспроизведения системного АРЧМ;

$$K_{\text{МУТ}} \quad \text{и} \quad \frac{P_{\text{МУТ}}}{P_{\Delta\text{М}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{МУТ}} p}$$

– механизм управления турбиной; $K_{\text{П}}$ и $K_{\text{НКН}}$ – канал начальной динамической коррекции неравномерности быстродействующего контура (БдК) РМ, посредством которого через ЭГП формируется корректирующее воздействие РНК с ограничением, согласно уравнению $P_{\text{НК}}=(P_{\text{Э}}-K_{\text{П}}\rho_{\text{ПП}})K_{\text{НКН}}$, где: $P_{\text{Э}}$ – мощность СГ, а $\rho_{\text{ПП}}$ – давление пара за промежуточным пароперегревателем; $K_{\text{СКН}}$ – статическая коррекция неравномерности БдК РМ;

$$\frac{P_{\text{дм}}}{P_{\Delta}} = \frac{1 + T_{\text{дм}} p}{1 + T'_{\text{дм}} p}$$

– звено динамической коррекции БдК РМ; $K_{\text{ПА}}$ – динамическая коррекция БдК РМ;

$$\frac{\omega_{\text{ИЧ}}}{\omega} = \frac{K_{\text{ИЧ}}}{1 + T'_{\text{ИЧ}} p + T''_{\text{ИЧ}} p^2}$$

– измеритель скорости вращения турбины; коррекция БдК РМ;

$$\frac{\omega_{\text{ИЧ}}}{\omega} = \frac{K_{\text{ИЧ}}}{1 + T'_{\text{ИЧ}} p + T''_{\text{ИЧ}} p^2}$$

– измеритель скорости вращения турбины;

$$\frac{\omega_{\text{1ЧК}}}{\omega_{\Delta\text{Ч}}} = \frac{T_{\text{1ЧК}} p}{1 + T'_{\text{1ЧК}} p}$$

– динамическая частотная коррекция БдК РМ; $K_{\text{Р}}$ – многофункциональное управление разгрузкой через БдК РМ, в том числе противоаварийной автоматической импульсной разгрузкой (АИР), осуществляемой путем функционального изменения $K_{\text{Р}}$, обеспечивающего формирование:

$$\Delta P_{\text{АИР}} = \Delta P^{(0)}_{\text{АИР}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{АИР}}}},$$

где: $\Delta P^{(0)}_{\text{АИР}}$=var – часть $\Delta P_{\text{АИР}}$, снимаемая по экспоненциальному закону $\tau_{\text{АИР}}$=var;

$$\frac{P_{\text{ЭГП}}}{P_{\Delta\text{Э}}} = \frac{K_{\text{ЭГП}}}{1 + T_{\text{ЭГП}} p}$$

– общий канал БдК РМ;

$$K_{\text{РС}} = \frac{1}{\sigma}$$

– регулятор скорости (РС), где: σ=var – статизм; K_{ω_0} – задание уставки ω_0 РС;

$$\frac{\mu_{\eta}}{P_{\Sigma}} = \frac{1}{1 + T_{\eta} p}$$

– промежуточный золотник регулятора турбины; $\pm K_{\text{РДВ}}$ и $\pm K_{\text{РДН}}$ – каналы акцентного управления регулирующими клапанами (РК) части высокого давления (ЧВД) и части низкого давления (ЧНД) турбины с промышленными и теплофикационными отборами пара при осуществлении связанного регулирования, обеспечивающего автономность управления скоростью вращения турбины и давлением; $K_{\eta\text{в}}$ и $K_{\eta\text{н}}$ – коэффициенты передачи каналов акцентного управления РК ЧВД и ЧНД турбины по скорости вращения;

$$\frac{\mu_{s\text{во}}}{\mu_{\text{зво}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{зво}} p}$$

– открытие окон золотника сервомотора РК ЧВД;

$$\frac{\mu_{\text{во}}}{\mu_{s\text{во}}} = \frac{1}{T_{\text{во}} p}$$

– перемещение поршня сервомотора РК ЧВД на открытие;

$$\frac{\mu_{s\text{вз}}}{\mu_{\text{звз}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{звз}} p}$$

– закрытие окон золотника сервомотора РК ЧВД;

$$\frac{\mu_{\text{вз}}}{\mu_{s\text{вз}}} = \frac{1}{T_{\text{вз}} p}$$

– перемещение поршня сервомотора РК ЧВД на закрытие;

$$\frac{\mu_{s\text{со}}}{\mu_{\text{зсо}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{зсо}} p}$$

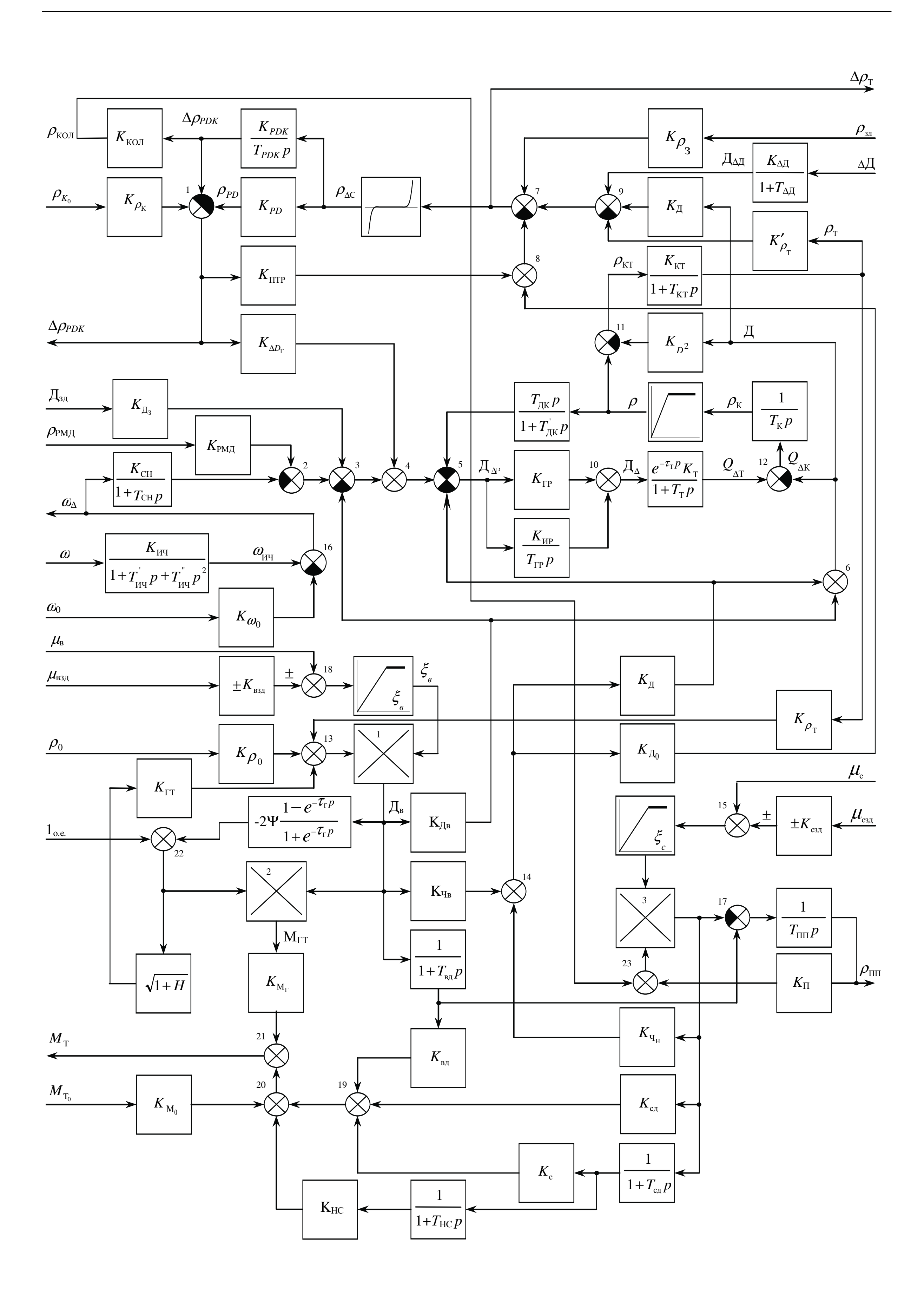
– открытие окон золотника сервомотора РК части среднего давления (ЧСД) или ЧНД, или их обобщения, которое обычно также обозначают ЧНД;

$$\frac{\mu_{\text{со}}}{\mu_{s\text{со}}} = \frac{1}{T_{\text{со}} p}$$

– перемещение поршня сервомотора РК ЧСД, ЧНД на открытие;

$$\frac{\mu_{s\text{сз}}}{\mu_{\text{зсз}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{зсз}} p}$$

– закрытие окон золотника сервомотора РК ЧСД, ЧНД;



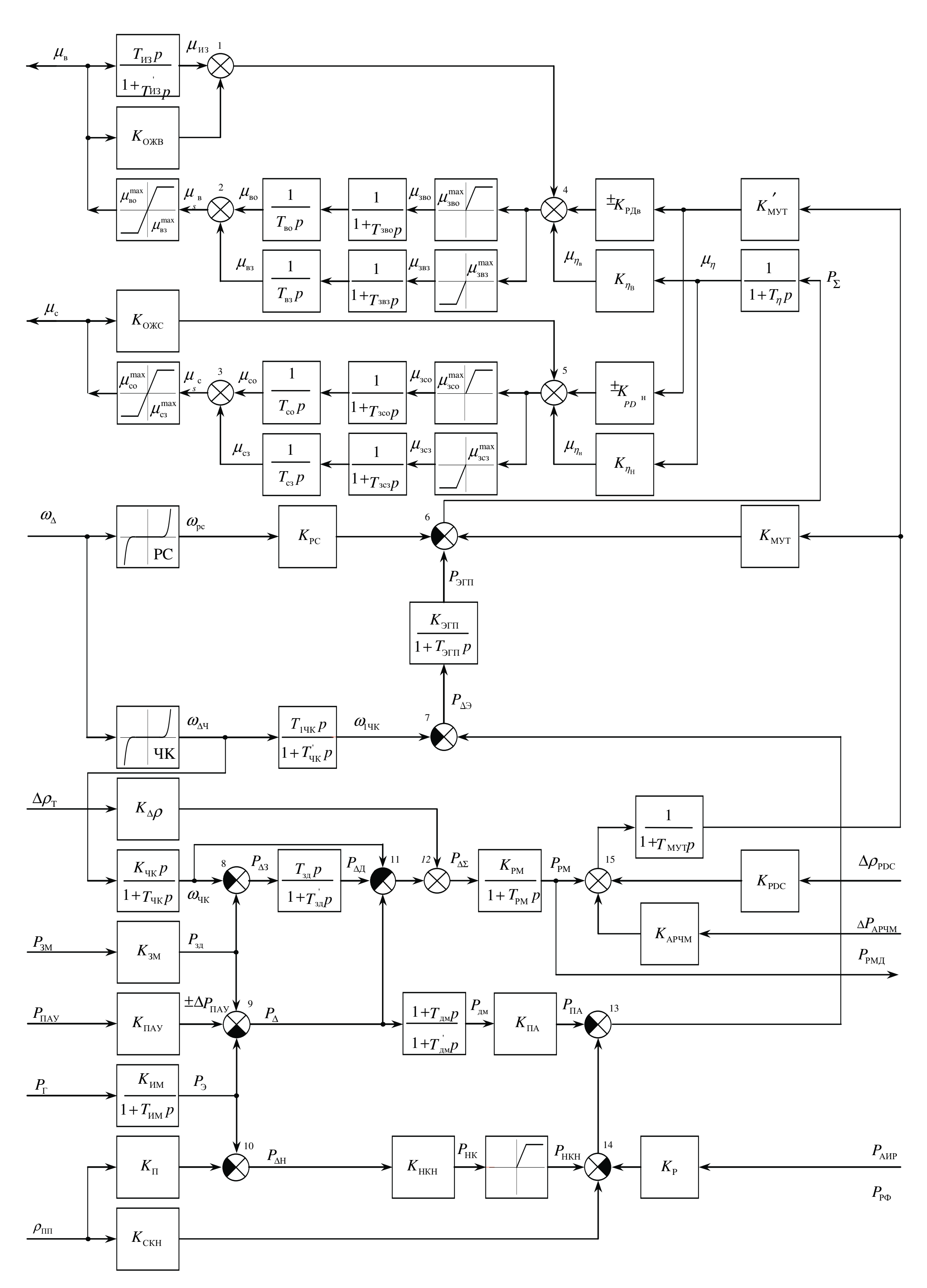


Рис. 1. *Функциональная операторная схема математической модели первичных двигателей*

$$\frac{\mu_{сз}}{\mu_{sсз}} = \frac{1}{T_{сз}p}$$

– перемещение поршня сервомотора РК ЧСД, ЧНД на закрытие; $K_{ОЖВ}$ и $K_{ОЖС}$ – коэффициенты жесткой отрицательной обратной связи систем управления РК ЧВД и ЧСД, ЧНД, соответственно;

$$\frac{\mu_{из}}{\mu_{в}} = \frac{T_{из}p}{1+T'_{из}p}$$

– гибкая отрицательная обратная связь системы управления задвижкой направляющего аппарата гидротурбины, функции которой в этом случае возлагаются на систему управления РК ЧВД с соответствующими изменениями параметров передаточных функций, а аналогичная система ЧСД, ЧНД при этом не используется; $\xi_в$ – степень открытия РК ЧВД паровой турбины или задвижки направляющего аппарата гидротурбины; $\pm K_{взд}$ – многофункциональное задание предварительного положения РК ЧВД, задвижки направляющего аппарата или различного рода возмущающих воздействий типа дребезга и др.; $\xi_с$ – степень открытия РК ЧСД, ЧНД паровой турбины; $\pm K_{сзд}$ – многофункциональное задание предварительного положения РК ЧСД, ЧНД или различного рода возмущающих воздействий и др.;

$$\frac{\rho_{ПП}}{Д_{ПП}} = \frac{1}{T_{ПП}p}$$

– промежуточный пароперегреватель, где: $Д_{ПП}$ – расход пара через пароперегреватель; $Д_в$ – расход пара через ЧВД, равный произведению $\xi_в$ на соответствующее давление пара, в зависимости от типа турбины и режима работы согласно функциональной операторной схеме, или расход воды при моделировании гидротурбины, равный произведению $\xi_в$ (степень открытия задвижки направляющего аппарата) на $\sqrt{1+H_в}$ в соответствии с законом истечения жидкости через задвижку, где: $H_в$ – относительное превышение напора воды перед задвижкой направляющего аппарата, определяемое с учетом явления гидроудара (ГУ) передаточной функцией [3]

$$\frac{H_в}{Д_в} = -2\Psi\frac{1-e^{-\tau_Г p}}{1+e^{-\tau_Г p}},$$

где: $\Psi = \dfrac{aV}{2H_g}$ – ударная характеристика водовода, a – скорость распространения волны ГУ, V – скорость потока воды, H_g – номинальный напор воды,

$$\tau_Г = \frac{2L}{a}$$

– фаза ГУ для трубопровода длиной L;

$$\frac{Д_{вд}}{Д_в} = \frac{1}{1+T_{вд}p}$$

– паровой объем ЧВД, где: $Д_{вд}$ – расход пара через этот объём; $K_{вд}$ – доля мощности и соответственно момента турбины ($M_Т$) за счет ЧВД; $K_{сд}$ – часть доли мощности и соответственно $M_Т$ за счет ЧСД;

$$\frac{Д_{сд}}{Д_с} = \frac{1}{1+T_{сд}p}$$

– эквивалентный паровой объема ЧСД, расположенный за контуром промперегрева, где: $Д_{сд}$ – расход пара через этот паровой объем, $Д_с$ – расход пара через ЧСД, равный произведению ос на соответствующее давление пара согласно функциональной схеме; $K_с$ – доля мощности и соответственно $M_Т$ за счет ступеней ЧСД, расположенных за указанным выше эквивалентным паровым объемом;

$$\frac{Д_{НС}}{Д_{сд}} = \frac{1}{1+T_{НС}p}$$

– эквивалентный паровой объем, расположенный за РК ЧНД, где: $Д_{НС}$ – расход пара через ЧНД; $K_{НС}$ – доля мощности и соответственно $M_Т$ за счет ЧНД; $K_{М_Г}$ – многоцелевое управление, в частности для моделирования различного рода возмущений, а также обнуления момента гидротурбины $M_Г = K_{М_Г}Д_в(1+H_в)$, при моделировании паровой турбины; $K_{Мо}$ – воспроизведение разнообразных аддитивных возмущений $M_Т$; $K_{ГТ}$, $K_{\rho т}$, $K_{\rho о}$, $K_{чн}$, $K_{чв}$, $K_{КОЛ}$, $K_{До}$, $K_{Д}$, $K_{Дв}$, $K_{ПП}$ – многофункциональные коэффициенты, позволяющие, в частности, задавать тип и режим работы моделируемого первичного двигателя:

$$\frac{\rho_К}{Q_{\Delta К}} = \frac{1}{T_К p}$$

– парогенератор (котлоагрегат (КА)), где: $Q_{\Delta К}$ – количество тепла, необходимое для производства расходуемого количества пара $Д_\Delta$ с давлением $\rho_К$;

$$\frac{Q_{\Delta Т}}{Д_\Delta} = e^{-\tau_Т p}\frac{K_Т}{1+T_Т p}$$ – тракт топливоподачи, где:

$$\frac{L_Т}{Д_\Delta} = e^{-\tau_Т p};\quad \frac{Q_{\Delta Т}}{L_Т} = \frac{K_Т}{1+T_Т p}$$ – топка;

$$\frac{\rho_{ДК}}{\rho} = \frac{T_{ДК}p}{1+T'_{ДК}p}$$

– динамическая коррекция контура регулирования производимого КА тепла по давлению; $K_{ГР}$ – пропорциональная часть пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора топлива (главного регулятора) КА;

$$\frac{Д_{ДИ}}{Д_{ДР}} = \frac{K_{ИР}}{T_{ГР}p}$$

– интегральная часть ПИ – регулятора топлива КА;

$$\frac{Д_{СН}}{\omega_\Delta} = \frac{K_{СН}}{1+T_{СН}p}$$

– коррекция производительности КА из-за изменения режима работы оборудования собственных нужд, обусловленного отклонениями частоты ω_Δ; $К_{Дз}$ – задание паропроизводительности $Д_{зд}$ КА и ее изменения $Д_{\Delta з}$; $K_{РМД}$ – канал РМ управления производительностью КА; K_{p^2} – перепад давления пара перед турбиной, определяемый уравнением

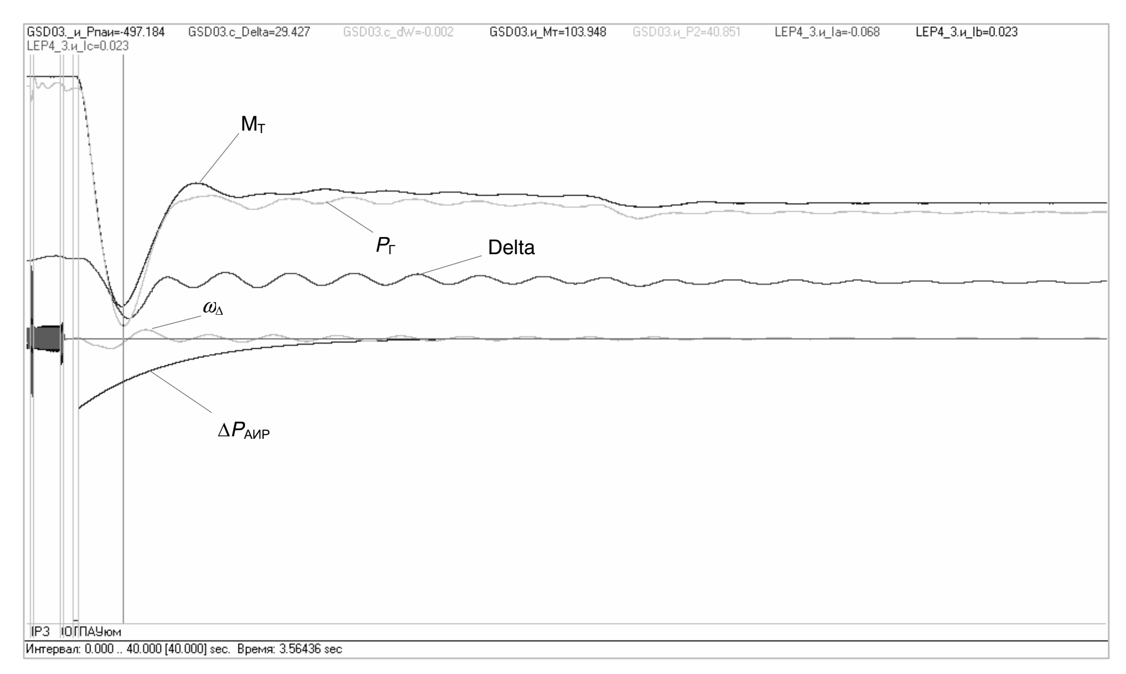


Рис. 2. *Процесс противоаварийной разгрузки энергоблока 800 МВт Сургутской ГРЭС-2, где: $M_{Т}$ – момент турбины, $P_{Г}$ – активная мощность генератора, Delta – взаимный угол генератора*

$\Delta\rho_{Т}=K_{D^2}Д^2$ по сравнению с давлением на выходе КА $\rho_{К}$, где: Д – расход пара через турбину;

$$\frac{\rho_{Т}}{\rho_{КТ}}=\frac{K_{КТ}}{1+T_{КТ}p}$$

– паропровод между КА и турбиной; $K_{\rho т}$ – обобщенный измеритель давления пара перед турбиной; $K_{\rho з}$ – задание давления пара перед турбиной; $K_{Ди}$ – обобщенный измеритель расхода пара через турбину;

$$\frac{Д_{ДД}}{Д_{ДП}}=\frac{K_{\Delta Д}}{1+T_{\Delta Д}p}$$

– изменение потребления пара из коллектора вследствие каких-либо возмущений у потребителя $Д_{\Delta П}$; $K_{ПТР}$ – взаимосвязь между изменением давления в коллекторе $\Delta\rho_{PDK}$ и отклонением расхода пара $\Delta Д$; $K_{\rho к}$ – задание уставки давления в коллекторе $\rho_{Ко}$; $K_{\Delta Dг}$ – общий канал главного ПИ-регулятора КА; K_{PD} – пропорциональная часть ПИ-регулятора давления КА;

$$\frac{\rho_{PD}}{\rho_{\Delta С}}=\frac{K_{PDK}}{T_{PDK}p}$$

– интегральная часть ПИ-регулятора давления КА.

Синтезированная модель учитывает практически все основные процессы в первичных двигателях, в результате чего значительно повышается точность моделирования динамического баланса генерируемой и потребляемой мощности в ЭЭС, а, следовательно, процессов изменения частоты и перераспределения генерации между энергоблоками и электростанциями с учетом их колебательной устойчивости. Значительно точнее воспроизводятся динамические переходы, связанные с противоаварийной разгрузкой энергоблоков, что позволяет более достоверно оценивать динамическую устойчивость ЭЭС и оптимально настраивать средства противоаварийной автоматики.

Адекватность рассмотренного моделирования различных видов и типов первичных двигателей подтверждены результатами его использования в составе созданных в НИЛ «Моделирование ЭЭС» гибридных моделирующих комплексов, в частности для ОАО «Тюменьэнерго», на котором проведены успешные исследования противоаварийной разгрузки энергоблоков Сургутских ГРЭС-1 и ГРЭС-2 [6]. Фрагмент этих исследований иллюстрирует рис. 2.

Следует также отметить большое значение рассмотренного моделирования первичных двигателей для создания надежных и эффективных отладочно-тренажерных комплексов АСУТП энергоблоков [7].

Выводы

1. Разработанная математическая модель первичных двигателей синхронных генераторов позволяет адаптировать ее для моделирования всех видов и типов используемых первичных двигателей с учетом их систем и законов регулирования.
2. В полученной математической моделе первичных двигателей отображены все значимые элементы оборудования, что служит объективной гарантией повышения уровня адекватности моделирования.
3. Основные результаты разработки подтверждены практикой их использования при эксплуатации Гибридного моделирующего комплекса Тюменской энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
2. Плетнев Г.П., Штробель В.А., Мухин В.С. Исследования систем автоматического регулирования мощности парогенератора и турбины в режиме регулирования частоты // Теплоэнергетика. – 1972. – № 11. – С. 55–57.
3. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
4. Рабинович Р.С., Полонская М.А. Модели тепловых электростанций для расчета длительных электромеханических переходных процессов в энергосистемах // Электричество. – 1983. – № 3. – С. 11–19.
5. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 122 с.
6. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС: результаты разработки, исследования и опытной эксплуатации // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов III Всеросс. научно-техн. конф. с международным участием в 2 т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. – Т. 1. – С. 216–222.
7. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс для наладки АСУ ТП энергоблоков и тренажа персонала // Электроэнергия и будущее цивилизации: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск: Томский государственный университет, 2004. – С. 327–328.